

Institut für Reaktorentwicklung
KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH
des Landes Nordrhein-Westfalen - e. V.

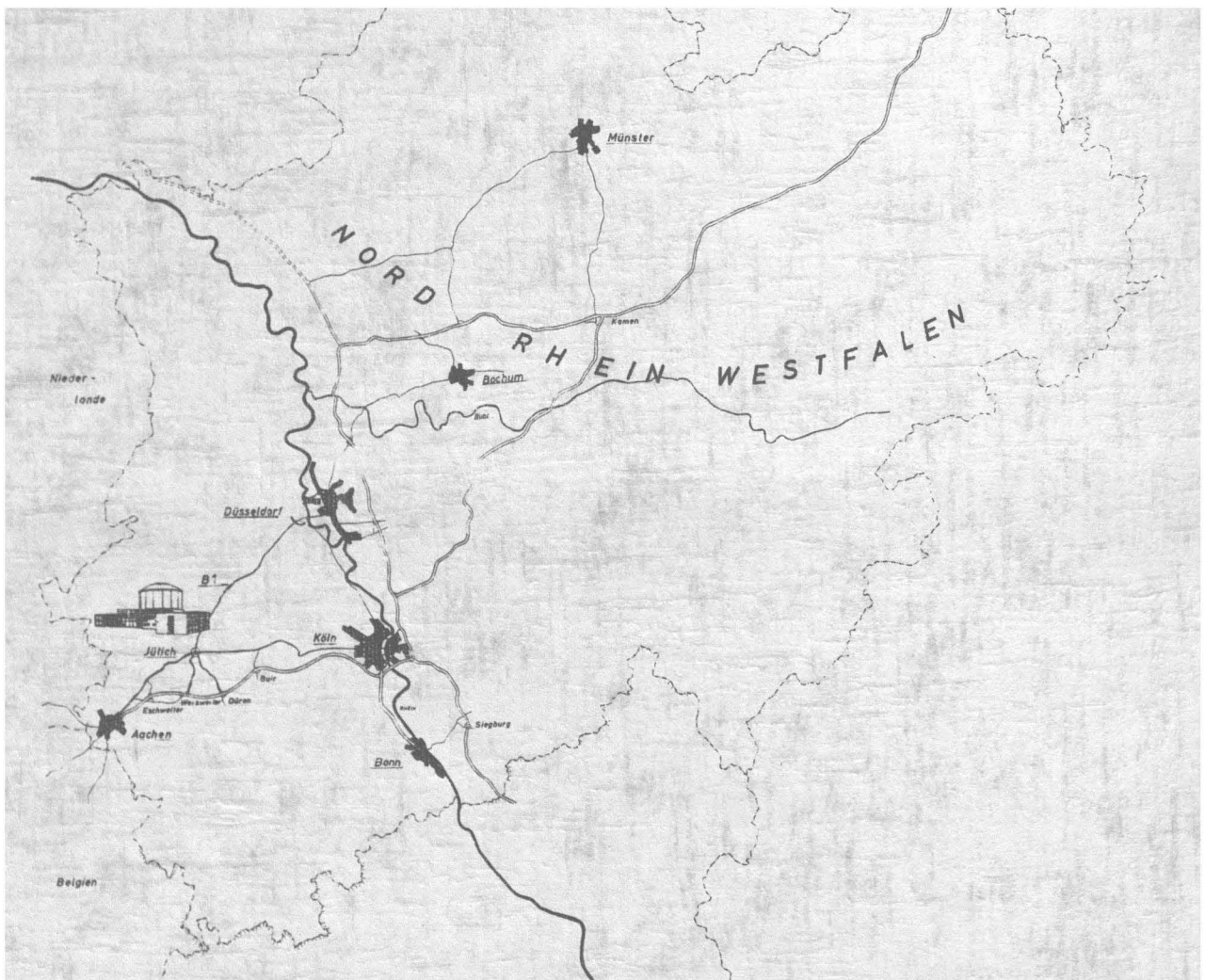
Eine einfache Anordnung zur Feststellung
von Formänderungen
elektrisch leitender Kugeln

von
R. Hecker

Jül - 357 - RG

Februar 1966

Als Manuskript gedruckt



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 357

Institut für Reaktorentwicklung Jül – 357 – RG

Dok.: Reactor Fuel Spheres - Deformation Detection

DK: 621.039.54-49: 539.37

621.317.39: 531.7

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich,
Jülich, Bundesrepublik Deutschland

Eine einfache Anordnung zur Feststellung
von Formänderungen
elektrisch leitender Kugeln

von

R. Hecker

Eine einfache Anordnung zur Feststellung von Formänderungen elektrisch leitender Kugeln

von R. Hecker

In einem Kugelhaufenreaktor ¹⁾, wie er zur Zeit in Jülich gebaut wird, werden kugelförmige Brenn- und Brutelemente verwendet. Diese Brenn- oder Brutelemente bestehen aus einer Graphitkugel, in deren Innern - sei es in geeignet geformten Hohlräumen oder eingepreßt - der Brenn- oder Brutstoff in Form von mit Pyrokohlenstoff umhüllten Teilchen vorliegt. Die Graphitkörper, die gleichzeitig das Moderatormaterial des Reaktors darstellen, müssen von hinreichender mechanischer Festigkeit sein, um bei Fällen aus mehreren Metern Höhe auf ein heißes Kugelbett intakt zu bleiben. Kugelbeschädigungen oder gar ein Zerbrechen der Kugeln könnte zu verringertem Spaltproduktrückhaltevermögen und zu einer unerwünschten Ver-
seuchung des Primärkreislaufes führen. Es ist daher wünschenswert, während des kontinuierlichen Kugelumwälzvorganges bei Reaktorbetrieb Kugeln mit Durchmesseränderungen (z.B. bedingt durch gleichmäßigen Abrieb oder Abplatzungen) aus dem Kugelkreislauf des Reaktors auszuscheiden und dies ohne Berücksichtigung des Abbrandzustandes. Neben den genannten Gründen ist eine Ausscheidung von Kugeln mit Durchmesseränderungen auch für den einwandfreien Betrieb der Beschickungsanlage von Wichtigkeit. Bei dieser pneumatisch arbeitenden Anlage können nur Durchmesseränderungen von wenigen mm toleriert werden. Aufgabe der hier beschriebenen Versuche war es, eine nicht mechanische Methode zur Erkennung von beschädigten Kugeln zu erarbeiten. Wegen der großen Zahl der auf Formänderungen zu prüfenden Kugeln und wegen deren möglichen hohen Aktivität, ist für diese Prüfung eine automatisch arbeitende Anlage erforderlich.

Über die Beschaffenheit eines solchen Prüfverfahrens lassen sich - unabhängig von der Art seiner möglichen Realisierung - einige Aussagen allgemeiner Art machen:

- a) Da die Prüfvorrichtung an nicht ohne weiteres zugänglichen Stellen (Strahlung) aufgebaut werden muß, ist größtmögliche Einfachheit und damit verbunden weitgehende Wartungsfreiheit wünschenswert.
- b) Das Verfahren muß so beschaffen sein, daß es nur auf Radiusveränderungen anspricht, während Verschiedenheiten - z.B. bedingt durch den Verwendungszweck der Kugeln (Brennstoff-, Moderator- oder Brutkugeln) - hier uninteressant sind und anderweitig erfaßt werden müssen.

Wir versuchten unter Ausschluß von mechanischen oder optischen Verfahren das Problem dadurch zu lösen, daß wir den Einfluß von Kugeln verschiedener Beschädigungsgrade auf das Resonanzverhalten eines Schwingkreises hoher Güte ermittelten.

Bei den im folgenden zu beschreibenden Versuchen erwies es sich als vorteilhaft, die Kugeln in das Magnetfeld einer zylindrischen Spule einzugeben, also eine Verstimmung des Kreises über eine Veränderung von L zu erreichen.

Versuche:

Für Vorversuche wurden auf einen zylindrischen Plexiglaskörper mit einem Außendurchmesser $\varnothing_a = 65$ mm und einem Innendurchmesser $\varnothing_i = 62$ mm (Kugeldurchmesser = 60 mm) 50 Windungen aufgebracht, (Gesamtlänge der Spule 130 mm). Mit Hilfe einer in Serie geschalteten Kapazität von 15 pF wurde dann ein Schwingkreis hergestellt, wie er in Abbildung 1 skizziert ist. Die Plexiglasspule enthält im Innern einen Support zur Aufnahme der Graphit-Kugeln. Die Resonanzfrequenz des Schwingkreises ohne Kugel beträgt 5,65 MHz, mit Kugel 7,25 MHz. (Kurvenblatt I zeigt die Resonanzkurven des Kreises mit und ohne Kugel.) Durch das Einbringen der Kugeln wird also die Resonanzfrequenz des Kreises um rund 1,6 MHz erhöht. Diese hohe Verstimmung gibt Anlaß zu der Hoffnung, daß sich ein Zusammenhang zwischen dem Resonanzverhalten des Kreises und dem Beschädigungsgrad der Kugeln experimentell auffinden läßt.

Unter einer definierten Beschädigung verstehen wir hier eine Durchmesseränderung um d mm an irgendeiner Stelle der Kugel z.B. bedingt durch das Fehlen einer Kugelkalotte von der Höhe d . Für unsere Versuche erwies sich eine solch einfache Definition als zweckmäßig.

Die ersten Untersuchungen zeigen, daß die Verstimmung bzw. die Dämpfung des Kreises (bei festgehaltener Frequenz) nicht nur von der Größe des Schadens abhängt, sondern auch von der Orientierung der Schadensstelle zur Spulenachse. Es ist dabei wesentlich, daß aufgrund der Beschädigung ein Spalt zwischen Kugeloberfläche und Spulenkörper frei bleibt, durch den ein Teil der magnetischen Feldlinien noch ungestört hindurchtreten kann.

Es zeigte sich, daß unter solchen Bedingungen Kugeln mit Beschädigungen bis zu $d = 5$ mm ohne weiteres mit der verwendeten Anordnung über hinreichend große Änderungen der Abstimmungsfrequenz des Kreises nachzuweisen sind. Diese Grenze ist rein zufällig und von der vorliegenden Anordnung abhängig. Wir kamen überein, eine Durchmesseränderung von 6 mm als vorläufige Grenze anzusehen, bei der die Kugel ausgeschieden werden muß.

Wenn wir für die weiteren Betrachtungen die Resonanzkurve I zugrunde legen, dann ist ersichtlich, daß eine beschädigte Kugel bei entsprechender Schadenslage und der dafür bestimmten Resonanzfrequenz in erster Näherung einen Spannungsausschlag ergibt, der sich aus der Resonanzkurve für die Vollkugel bei eben dieser Frequenz ablesen läßt. (Jedenfalls gilt das angenähert für kleinere Beschädigungen.) Auch der Spannungsausschlag bzw. die Dämpfung des Kreises kann daher als Maß für die Beschädigung der Kugel verwendet werden. Man sieht unmittelbar ein, daß gilt: Je enger die Resonanzbreite des Kreises (je besser die Kreisgüte) desto besser die Empfindlichkeit des Nachweises beschädigter Kugeln. Die geschilderten einfachen Vorversuche lehren also, daß es prinzipiell möglich ist, auf diese Weise beschädigte Kugeln zu erfassen. Zwei Meßgrößen stehen dazu zur Auswahl: Verstimmung und Dämpfung. Um noch möglichst kleine Beschädigungen über große Verstimmungen des Resonanzkreises nachzuweisen, muß mit möglichst

kleinen Bandbreiten gearbeitet werden.

Unsere nächsten Versuche zielten daher auf eine Verbesserung der Nachweisempfindlichkeit durch Verringerung der Bandbreite ab. Ein möglicher Weg zur Verbesserung der Güte eines Schwingkreises ist der, diesen als Bestandteil in einem stark mitgekoppelten Verstärker einzubauen ¹⁾. Wir bauten daher einen solchen Selektivverstärker und trennten diesen zur Vermeidung unerwünschter Rückwirkungen durch einen Kathodenfolger vom Sender (Rhode & Schwarz 10 Hz - 10 MHz). Indem wir die oben beschriebene Meßspule beim Bau eines solchen Verstärkers verwendeten, erzielten wir eine Resonanzfrequenz von 2,8 MHz und eine Bandbreite von etwa 100 kHz. (Da die Meßspule im Reaktor irgendwie von leitenden Teilen umgeben sein wird (Stahlrohr), also abgeschirmt und damit bedämpft ist, ahmten wir diese Verhältnisse nach, indem wir die Spule durch ein Stahlrohr von einem Durchmesser $\emptyset = 125$ mm und einer Länge von 900 mm abschirmten. Diese Abschirmung und die mit ihr Hand in Hand gehende Bedämpfung unseres Kreises erschweren besonders bei höheren Frequenzen in der verwendeten Schaltart das Zustandekommen kleiner Bandbreiten.)

Mit Hilfe einer solchen Anlage (Beschreibung des Kreises siehe unten) lassen sich jetzt wieder ähnliche Versuche durchführen, wie sie bereits anfangs beschrieben wurden. Die Resonanzfrequenz des Kreises bei in der Spule befindlicher Vollkugel beträgt 2,81 MHz, die zu diesem Resonanzfall gehörende HF-Amplitude und die Amplitude bei Eingabe verschieden beschädigter Kugeln ergeben sich normiert auf 100 Volt:

Vollkugel:	100 Volt
Kugel mit $d = 6$ mm	91 Volt
Kugel mit $d = 9$ mm	87 Volt.

Diese recht gut meßbaren Effekte legen es nun nahe, weitere Versuche so auszuführen, daß die zu prüfende Kugel durch die Meßspule hindurchrollt. Beim Rollen durch die Spule wird die Schadensstelle wahrscheinlich einmal in eine günstige Lage zur Windungsfläche geraten und damit größte Verstimmung ergeben, d.h. größte Nachweisempfindlichkeit. Es schien für diese weiteren

Versuche sinnvoll, die Spulenlänge auf mindestens 5 bis 6 Kugeldurchmesser zu verlängern (um in der Mitte einen möglichst homogenen Feldbereich zu erzeugen). Eine gesteigerte Spulenlänge bedeutet jedoch im allgemeinen mehr Windungen, somit eine größere Induktivität und damit tiefere Resonanzfrequenzen des Kreises. Der Übergang zu tieferen Frequenzen bietet jedoch den Vorteil, daß sich die Mitkopplung unseres Selektivverstärkers besser beherrschen und regeln läßt als bei höheren Frequenzen, d.h. es lassen sich bedeutend geringere Bandbreiten erzielen, ohne daß die Verstärkerstufe zu schwingen beginnt. Wir erzielten mit einer Spule von 600 mm Länge (5 Windungen pro 10 mm) eine maximale Frequenz von 650 kHz und erreichten Bandbreiten von 15 kHz ohne besondere Mühe, was für unsere Versuche ausreichend war. Bei unseren Versuchen stimmten wir die Anlage stets auf die Vollkugel-Resonanzfrequenz ab, also ist sie leer verstimmt und zeigt eine geringere HF-Amplitude als bei eingegebener Vollkugel. Beim Eintritt einer Kugel in die Meßspule wächst die HF-Amplitude um schließlich ein Maximum zu erreichen und dann beim Austritt aus der Spule ebenso wieder abzufallen. Da unsere Spule ziemlich lang ist, können wir mit einem homogenen Teilabschnitt derselben rechnen. In der Tat kann man auf dem Oszillographen feststellen, daß die HF-Amplitude etwa 0,2 sec lang fast konstant bleibt. Die HF wird beim Durchrollen der Kugel moduliert. Da die zu beobachtenden Vorgänge langsam sind und im übrigen einmalig, benutzten wir zur Beobachtung derselben einen Blauschreiber (Typ Storaskop, Wandel & Goltermann).

Da die "Modulationskurve" mutmaßlich die gesuchten Informationen über den Beschädigungsgrad der Kugel enthalten wird, besteht die Notwendigkeit, die Hüllkurven rein, d.h. ohne HF zu gewinnen.

Dazu wird zunächst die Trägerfrequenz gleichgerichtet und mittels eines Tiefpasses nur die Hüllkurve (Modulation) zur Verstärkung weitergeleitet. Die verwendete Schaltung ist aus beigefügtem Schaltplan (Kanal 1) zu ersehen.

Die hier verwendete Gleichrichtungsart - sogenannte HF-Spitzen-gleichrichtung ²⁾ - ist besonders geeignet zur Gleichrichtung von Schwingungen mit großer Amplitude, und um solche handelt es sich hier, denn die HF-Amplitude hinter dem Selektivverstärker beträgt zwischen 40 und 50 Volt. Nach dem Gleichrichten und dem Ableiten der HF erhält man auf dem Blauschreiber Hüllkurven wie in Abbildung 2 dargestellt. Man sieht, daß für Vollkugeln die Hüllkurven im Mittelstück relativ glatt verlaufen, während beschädigte Kugeln dann eine relativ starke Welligkeit im Mittelstück zeigen, wenn sie über ihre Schadensstelle hinwegrollen. Beim Vergleich der Hüllkurven verschieden stark beschädigter Kugeln erkennt man, daß die Größe der Welligkeit der Größe der Beschädigung proportional ist.

Die erste Folgerung, die wir bereits oben gezogen haben, und die sich aus dem relativ flachen Verlauf des Mittelstücks des Impulses ergibt, ist die, daß im mittleren Teil der Spule ein homogenes Feld vorliegt. Das stimmt überein mit Beobachtungen, die wir beim Abstimmen des Resonanzkreises machten und wobei festgestellt wurde, daß die Resonanzfrequenz gegenüber Verschiebungen der Vollkugel im Mittelstück der Spule relativ unempfindlich ist. Zweitens ist leicht zu erklären, wie die Welligkeit zustande kommt, wenn die Kugel über ihre Schadensstelle hinwegrollt: Normalerweise füllt der Querschnitt der Kugel beim Rollen den Querschnitt der Spule bis auf ein kleines Spiel aus. Rollt aber die Kugel über ihren Schaden hinweg, so entsteht ein Spalt, je nach der Größe des Schadens, durch den jetzt Feldlinien unbehindert durch die Kugel hindurchtreten können. Der Feldlinienfluß wird also durch die Kugel weniger gestört, und es kann die Anordnung nicht die volle Abstimmung erreichen wie für eine Vollkugel. Der Resonanzkreis wird also beim Durchrollen einer beschädigten Kugel gegenüber der Vollkugel abwechselnd mehr oder weniger verstimmt, was die variierende Amplitude der HF-Schwingung ergibt.

Weiter konnte festgestellt werden, daß es trotz der relativ tiefen Frequenz von 650 kHz keinen Unterschied ausmacht, ob eine Graphit-Vollkugel oder eine Brennstoff-Kugel (also eine solche mit Hohlräumen) durch die Meßspule rollt. Es wurde für diesen Versuch eine Graphit-Vollkugel so weit ausgehöhlt, daß nur eine Schale von 10 mm Wandstärke stehen blieb. Bei 650 kHz (Schwingkreis abgestimmt mit Vollkugel) zeigte diese Kugel im Vergleich mit der Vollkugel keine erkennbaren Unterschiede, weder in der Resonanzfrequenz noch in der Bedämpfung des Kreises. Damit ist die allgemeine Forderung b (siehe Seite 2) erfüllt und gezeigt, daß bereits bei dieser tiefen Frequenz die Feldlinien in einer Schale < 10 mm verlaufen. (Die Neigung der Spule samt Abschirmrohr betrug etwa 45° , die Durchlaufzeit einer Kugel durch die Meßspule ca. 0,3 sec.)

Es seien an dieser Stelle einige Bemerkungen über die benutzte Schaltung gemacht: Unerwünschte Rückwirkungen des Selektivverstärkers auf den Sender und umgekehrt wurden dadurch vermieden, daß beide Stufen durch einen Kathodenfolger getrennt waren. Der Kathodenfolger wurde mit Hilfe einer Röhre EF 80 aufgebaut und zeigt keinerlei schaltungstechnische Besonderheiten. Wir verwendeten als Sender einen solchen der Firma Rhode & Schwarz, dessen Frequenzbereich sich von 10 Hz bis 10 MHz erstreckte und dessen Ausgangsspannung regelbar war von 0 Volt bis 10 Volt. Die Selektivverstärkerstufe wurde mit Hilfe einer Röhre EL 86 so aufgebaut, daß die Rückkopplung über C ga vor sich geht, sowie über den Kathodenwiderstand R_K . Der Arbeitspunkt der Röhre wird bewußt zur Erreichung eines hohen Innenwiderstandes R_i mit Hilfe eines großen Kathodenwiderstandes tiefgelegt. (R_i liegt parallel zum Resonanzkreis, welcher durch niederen R_i stark bedämpft würde und schlechtere Bandbreiten lieferte.) Als Kapazität dieses Parallelresonanzkreises, dessen Induktivität unsere Meßspule ist, dient die Anoden-Kathoden-Kapazität der EL 86 sowie Schaltkapazitäten; eine zusätzliche Kapazität in Form eines auch noch so kleinen Kondensators würde die Resonanzfrequenz noch weiter erniedrigen.

Es scheint nach den bisher beschriebenen Ergebnissen möglich zu sein, zur Identifikation einer beschädigten Kugel nur die Welligkeit der Hüllkurve auszunutzen ohne Berücksichtigung anderer Eigenschaften derselben, wie z.B. deren Maximal-Amplitude. Um nun die in der Welligkeit enthaltene Information über die Beschädigung der Kugel in Form möglichst einfacher verwertbarer Signale vorliegen zu haben (die einer späteren regelungstechnischen Nutzung dienen können) gingen wir wie folgt vor: Nach dem Gleichrichten der HF und deren Wegsieben, d.h. vor dem Eingang der NF-Verstärkerstufe wird die Hüllkurve differenziert. Das verbleibende Signal hinter der ersten NF-Verstärkerstufe ist dann in Abbildung 3 dargestellt. Mit diesen Signalen steuern wir dann eine zweite Verstärkerstufe an. Die negativen Spitzen - wie sie in Abbildung 4 gezeigt sind - rühren von der Differentiation von der ersten Verstärkerstufe unter nachfolgender Phasendrehung um 180° her. Nach weiterer Verstärkung sollte die in Abbildung 4 gezeigte zweite positive Spitze eigentlich negativ erscheinen, weil aber die letzte Verstärkerstufe durch den hohen positiven Impuls Gitterstrom zieht, bleibt auch hier im Endeffekt ein zwar etwas kleinerer, aber positiver Impuls stehen. Mit Hilfe einer hochsperrenden Diode 182 (Sperrspannung etwa 80 Volt) wurden nach der zweiten Verstärkerstufe sämtliche negativen Spitzen abgeschnitten und es verbleiben für die Vollkugel die in Abbildung 4 wiedergegebenen Signale, während bei der beschädigten Kugel hinter der letzten Verstärkerstufe mehr als 2 positive Spitzen erscheinen. Auf dem Blauschreiber kann man also jetzt feststellen, ob eine ganze oder eine beschädigte Kugel durch das Meßrohr gerollt ist, indem die Zahl der positiven Spitzen gezählt wird. Es fehlt aber noch ein Kriterium, welches aussagt, ob die Kugel so stark beschädigt ist, daß sie aus dem Kugelkreislauf auf jeden Fall ausgeschieden werden muß. Ein solches ist aber leicht in Form einer Diskriminatorstufe in die Anlage einzufügen, denn es wurde ja oben schon festgestellt, daß die Höhe der Welligkeit ein Maß für den Beschädigungsgrad der Kugel ist, wenn diese über ihre Schadensstelle hinwegrollt.

Wir bauten uns als Diskriminatorstufe einen Schmitttrigger mit Hilfe einer E29CC-Röhre und stellten die Schwelle so ein, daß eine Kugel mit fehlender Kalotte von $d = 6$ mm neben dem Anfangs- und Endimpuls noch einen dritten positiven Impuls auf dem Bildschirm ergab. Nunmehr besteht also für eine beschädigte Kugel das Kriterium, daß sie am Ausgang des Schmitttriggers mehr als 2 positive Impulse erzeugt.

Als nächstes interessierte ein Versuch, der kontrolliert, mit welcher Sicherheit eine solche Vorrichtung arbeitet. Anders gesprochen: Wie hoch ist der Prozentsatz von Kugeln, die von der Anlage als nicht beschädigt erkannt werden, obwohl sie nach der vereinbarten Definition als beschädigt zu gelten hätten? Zur Prüfung dieser Frage bauten wir einen Kugelkreislauf mit Hilfe einer Fördermaschine und stellten die Förderungsgeschwindigkeit so ein, daß etwa alle 20 sec eine Kugel unsere Meßstrecke durchlief. (Das entspricht etwa der Geschwindigkeit, mit der die Kugeln bei stationären Reaktorbetrieb aus dem Reaktor ausgegeben werden.) Weil es bei einem solchen simulierten Kreislauf unpraktisch wäre, die durch jede Kugel verursachte Impulszahl mit Hilfe des Blauschreiberbildes zu kontrollieren, verwendeten wir einen einfachen Schreiber. Der Schreiberanschluß wird zwischen Kathode und Erde eines Kathodenfolgers angeschlossen, der sich am Ende einer NF-Verstärkerstufe befindet. Das Gitter wird mit den positiven Rechteckimpulsen beaufschlagt. Eine vorherige Integration der Impulse war nicht notwendig, da der Schreiber aufgrund seiner Trägheit selbst wie ein Integrator wirkte; daher zeigt er für intakte Kugeln kleine Ausschläge und für beschädigte größere an. Ein Schreiberdiagramm sieht jetzt etwa wie folgt aus (Abbildung 5): Im vorliegenden Fall war jede 6. Kugel "Beschädigt".

Mit Hilfe dieses Kugelkreislaufes und nach Auswertung der Schreiberdiagramme wurde festgestellt, daß alle Schäden größer 9 mm zu 100 % von der Apparatur auch als beschädigt gemeldet wurden, alle kleineren Schäden jedoch nur zu einem Bruchteil von ca. 50 %. Es muß daher geprüft werden, warum 50 % der kleineren Schäden nicht registriert werden.

Aber nicht nur bei kleineren Beschädigungsgraden versagt die Apparatur zu 50 % aller Fälle, sondern auch dann, und zwar immer dann, wenn eine Kugel die Meßstrecke durchläuft, die durch gleichmäßigen Abrieb eine gleichmäßige Durchmesseränderung von z.B. 6 mm erfahren hat. Eine solche Durchmesseränderung ist aber per Definition nicht mehr tragbar. So wird z.B. eine Kugel mit 50 mm Durchmesser immer wieder als ganze Kugel angesprochen, obwohl sie aus unserem Kreislauf entfernt werden müßte. Zur Erklärung des beschriebenen Sachverhalts vergleichen wir die Hüllkurve, die eine Kugel mit 50 mm Durchmesser ergibt mit einer solchen, die eine Normalkugel von 60 mm Durchmesser ergibt: Wir stellen dann fest, daß die Amplitude des von der 50 mm Kugel herührenden "Impulses" erheblich kleiner ist als die einer Normalkugel. Dieses ist nach allem was bisher gesagt wurde auch verständlich, denn bei einer 50 mm Kugel wird nicht der ganze zur Verfügung stehende Spulenquerschnitt ausgefüllt, und damit der Fluß innerhalb der Spule nicht so stark beeinflußt, wie bei der Normalkugel; infolgedessen erreicht der Kreis nicht die der Vollkugel entsprechende Abstimmung und damit auch die NF nicht ihre volle Amplitude. Das gleiche Phänomen tritt auf, wenn eine beschädigte Kugel so läuft, daß ihre Drehachse senkrecht zur Schadensoberfläche steht, d.h. der Schaden immer in der gleichen Lage bleibt. Eine solche Kugel rollt nicht über ihren Schaden hinweg; infolgedessen bleibt auch hier ständig ein Luftraum unausgefüllt, je nach der Größe der Beschädigung. Auch hier wird die optimale Abstimmung des Kreises nicht erreicht und damit auch nicht die größte HF-Amplitude. Die unmittelbare Folge davon ist, daß die Hüllkurve in solchen Fällen in ihrer Amplitude kleiner sein wird als die einer Vollkugel entsprechende. Damit aber ist der Schlüssel der Erklärung der bei unserem Kugelkreislauf auftretenden Phänomene schon geliefert. Während des Förderprozesses in unserer Förderanlage legen sich alle Kugeln mit größeren Schäden entweder auf diesen Schaden oder um 180° dazu gedreht. Eine Seitenlage des Schadens ist aufgrund der dafür ungünstigen Schwerpunktanlage unwahrscheinlich. Eine solche Kugel wird so in den Meßspuleneinlauf eingegeben, daß sie über ihren Schaden hinwegrollt. Das erklärte nach oben Gesagtem die 100 prozentige Anzeige des Instrumentes bei größeren Schäden (9 mm). Geringer beschädigte Kugeln können aber auch so zum Spuleneinlauf ge-

langen, daß der Schaden an der Seite bleibt. Die Wahrscheinlichkeit dafür, daß eine Kugel so durch die Fördermaschine läuft, beträgt etwa 0,5, was die nur 50 % registrierten Schadensfälle bei kleineren Beschädigungsgraden erklärt.

Im Prinzip wäre nun eine Vorrichtung, die auch diese Information verarbeitet, einfach ein Schmitttrigger, dessen Schwelle so eingestellt ist, daß er nur dann einen Ausgangsimpuls ergibt, wenn die Hüllkurve eine Amplitude hat, die größer als ein vorgegebener Wert ist. Man könnte sich nun vorstellen, daß man diesen Impuls des zweiten Schmitttriggers, der in einem zweiten Meßkanal angebracht würde, in geeigneter Weise in Antikoinzidenz bringt z.B. mit dem ersten Impuls, der durch den Schmitttrigger im ersten Kanal erzeugt wird. (Bei beiden Impulsen handelt es sich ja um Rechteckimpulse, die aus der Differentiation des Anstieges der Hüllkurve gewonnen wurden (siehe Schaltbild).) Damit würde bewirkt, daß bei einer Vollkugel oder einer solchen, die zwar beschädigt, aber über ihre Schadensstelle hinwegrollt, der erste Impuls - gewonnen aus dem Anstieg der Hüllkurve - aufgehoben wird. Kleinere Kugeln (stark abgeriebene) oder solche, die in unserem Sinne schlecht durch die Meßstrecke laufen, zeigten dann auf jeden Fall einen größeren Schreiberausschlag als eine Vollkugel und würden also als beschädigt erkannt werden. Der Bau einer solchen Antikoinzidenzanordnung stößt aber aus folgenden Gründen auf Schwierigkeiten:

Wir haben es mit Anstiegszeiten unserer Hüllkurvenflanken von etwa 0,05 sec zu tun. Daher müssen wir damit rechnen, daß die Zündung der beiden Schmitttriggerstufen, die ja beide durch die gleiche Anstiegsflanke unseres Impulses angestoßen werden, um mindestens 0,01 sec verzögert stattfindet, da die Schwelle des zweiten Schmitttriggers nämlich erheblich höher eingestellt ist als die des ersten, d.h. der von der ersten Triggerstufe herrührende früher startende Impuls würde wenigstens teilweise durch eine irgendwie geartete Antikoinzidenzstufe hindurchgelassen werden, bis sich der zweite Impuls des Triggers mit der höheren Schwelle (der Sperrimpuls) aufgebaut hat. Man könnte natürlich daran denken, den ersten Impuls zu

verzögern, doch ist dies bei Verzögerungszeiten in der Größenordnung von 0,01 sec mit herkömmlichen Mitteln nicht mehr ganz einfach und läßt sich wahrscheinlich nur mit größerem Aufwand erreichen. Ein solcher kann aber nicht in unserer Absicht liegen, weshalb wir diese Schwierigkeit zu umgehen versuchten, um auf einfachere Weise auch diese zweite Information zu nützen. Wir bauten einen zweiten Verstärkerkanal anschließend an die Gleichrichterstufe auf und dimensionierten diesen so, daß Linearität für alle auftretenden Impulsgrößen gewährleistet war. Wie man aus dem beiliegenden Schaltbild für den zweiten Kanal ersieht, wurde vor der ersten Stufe erst einmal abgeschwächt dann verstärkt und der verstärkte Impuls differenziert, die positiven Anteile weggeschnitten mittels einer Diode OA 72, während die negativen Anteile schließlich auf das Gitter einer Leistungsröhre E 80 L gegeben werden. Die erste Stufe besteht aus einer EF 80 und hat hier nur den Sinn, die Phase um 180° zu drehen und soweit zu verstärken, daß die Röhre E 80 L gerade angesteuert wird. Eine Abschwächung vor der Röhre EF 80 findet deshalb statt, damit die positiven, etwa 6 Volt hohen Hüllkurvenimpulse nicht das Fließen von Gitterstrom verursachen. Nach Verstärkung durch die Leistungsröhre E 80 L erhalten wir wieder einen positiven Impuls, mit dem wir einen Schmitttrigger gleicher Bauart wie den von Kanal 1 ansteuern. Die positiven Impulse sind etwa 60 bis 70 Volt hoch.

Die Schwelle des Diskriminators wird jetzt so eingestellt, daß eine Kugel, der eine Kalotte mit $d = 6$ mm fehlt, und die um eine Achse senkrecht zur Schadensoberfläche läuft, am Schmitttrigger keinen Ausgangsimpuls mehr ergibt.

Da wir im Rahmen der gestellten Aufgabe nur bestrebt waren, die uns auf diese Weise zugänglich gemachten Informationen bezüglich der Kugelgestalt sichtbar zu machen, aber nicht bestrebt sind - vorerst jedenfalls, diese Signale regelungstechnisch zu nutzen, beschränkten wir uns darauf, die uns durch die zweite Diskriminatorstufe zusätzlich gelieferte Information ebenfalls auf dem Schreiber sichtbar zu machen. Dazu gaben wir

die positiven Rechteckimpulse des Diskriminators von Kanal 2 auf das bisher unbenutzte Gitter der Röhre 2 unserer Schreiberschaltung (siehe Schaltbild für den zweiten Kanal). Eigentlich müßte sich nun der erste Rechteckimpuls - kommend aus Kanal 1 - an das Gitter der Röhre 1 unserer Schreiberschaltung mit dem aus Kanal 2 an das Gitter der Röhre 2 gelangenden Rechteckimpuls in der Wirkung aufheben; der Schreiber also keinen Ausschlag zeigen. Der Rechteckimpuls aus Kanal 2 wurde aber ein wenig größer gemacht, so daß wir also bei jeder Vollkugel - bedingt durch den aus Kanal 2 kommenden zusätzlichen Impuls - zuerst einen negativen Ausschlag auf den Schreiber erhalten; erst der oder die folgenden Impulse aus Kanal 1 reißen den Schreiber wieder ins Positive. Ein typisches Schreiberdiagramm sieht jetzt so aus: Auf dem Schreiber haben wir also jetzt durch die negative Spitze eine zusätzliche Information über die Kugelform gewonnen. Es läßt sich also sagen, daß beim Fehlen dieser negativen Spitze die getestete Kugel entweder ihrem Gesamtdurchmesser nach zu klein ist, oder daß sie so rollt, daß ihr Schaden während des Rollens nur an einer Seite bleibt. In beiden Fällen wäre die Kugel also schlecht und müßte aus dem Kreislauf ausgeschieden werden, was durch diese Art der Anzeige zum Ausdruck gebracht wird. Die Informationen, die der erste Kanal uns liefert, äußern sich auf dem Schreiber in genau der gleichen Weise wie vorher, d.h. bei einer beschädigten Kugel durch einen vergrößerten Ausschlag. Durch die Hinzunahme des zweiten Kanals sollten nun also auch die Fehlermöglichkeiten der Apparatur für kleinere Schäden weitgehend ausgeschieden sein. Diesen Sachverhalt prüften wir wieder mit Hilfe eines Kugelkreislaufes und stellten fest, daß nunmehr beschädigte Kugeln in 95 % aller Fälle als solche zur Anzeige gebracht werden.

Trotz dieses Mangels darf aber festgestellt werden, daß mit der von uns erstellten Anlage das gestellte Problem im Prinzip gelöst ist. Immerhin haben wir mit einem empfindlichen Glied (nämlich der Meßspule) bewiesen, daß wir die notwendigen Informationen über den Beschädigungsgrad der untersuchten Kugeln erlangen können,

während die gesamte übrige zur Beobachtung notwendige Apparatur an beliebiger Stelle aufgestellt werden kann. Auf die oben beschriebene recht einfache Art liefert uns unsere Apparatur für verschiedene Eigenschaften der Kugeln verschiedene Signale (positive oder negative Rechteckimpulse einstellbarer Höhe), die sich regelungstechnisch nutzen lassen zur Aussortierung von Kugeln, deren Beschädigungsgrad eine gewisse zulässige Größe überschreitet. Die regelungstechnische Nutzung der auf oben beschriebenem Wege gewonnenen Signale überschreitet jedoch den Rahmen dieser mehr grundsätzlichen Untersuchung.

Zum Schluß seien einige Überlegungen zu einer Verbesserung des Verfahrens angestellt. Nächster Schritt sollte sein, die Anordnung unter Berücksichtigung aller HF-technischen Regeln und bei optimaler Auslegung der einzelnen Stufen sauber aufzubauen. In diesem Zusammenhang soll zu den beigegeführten Schaltbildern gesagt werden, daß wir keinen Wert auf optimale Auslegung der einzelnen Stufen legten, mit Ausnahme der Notwendigkeit der Erlangung kleinster Bandbreiten. Uns kam es hier nur auf das Erkennen von Effekten an, die wir für unser Ziel ausnützen konnten.

Zur Zeit sind unsere Spulen so aufgebaut, daß die Windungen über einen dünnen (Wandstärke 1 mm) Plexiglaszylinder aufgebracht werden. Das Arbeiten mit Isolation und Kunststoff dürfte wohl kaum im wirklichen Betrieb möglich sein, sei es, daß die Spulen zu hohen Temperaturen ausgesetzt sind, oder daß sich die Kunststoffe auf die Dauer unter dem Einfluß intensiver Strahlung verändern und die Anordnung dadurch an der notwendigen Festigkeit verliert. Es soll daher versucht werden, die blanken Metallwindungen in Keramik einzubacken.

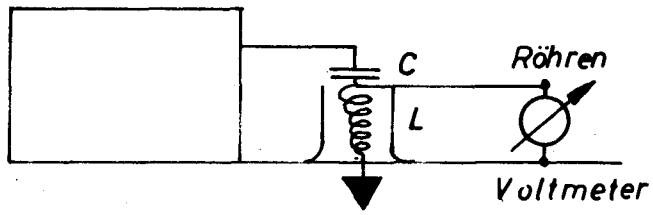
Weitere Versuche sollen darauf hinzielen, die Frequenz bedeutend höher zu treiben als dies hier der Fall war. Das läßt sich möglicherweise durch eine Verkürzung der Spule von hier 60 auf 45 cm erreichen zum anderen dadurch, daß man dicke Drähte verwendet (Flachdrähte) und dadurch weniger Windungen bei gleicher Spulenlänge erhält.

Weiterhin ist zu prüfen, wie sich die gewonnenen Signale regelungstechnisch optimal ausnutzen lassen. Sodann wäre an den Aufbau eines Sortierkreises zu denken.

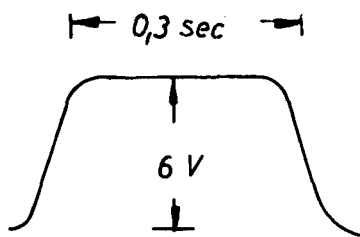
Literatur

- 1) R. Schulten Der Hochtemperaturreaktor von BBC-Krupp
 "Die Atomwirtschaft" Heft 9, 1959
- 2) M. Kulp Elektronenröhren und ihre Schaltungen
 Göttingen, van den Hoek u. Rupprecht 1951

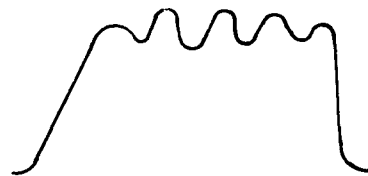
Meß-Sender
10 Hz - 10 MHz



1

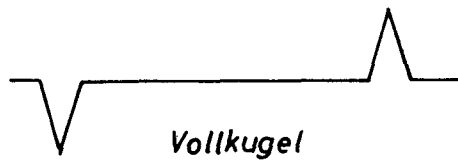


a) Hüllkurve für Vollkugel



b) Hüllkurve für beschädigte Kugel

2

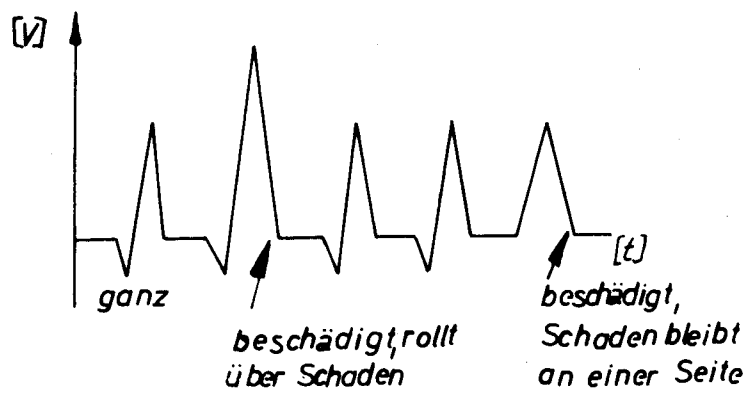
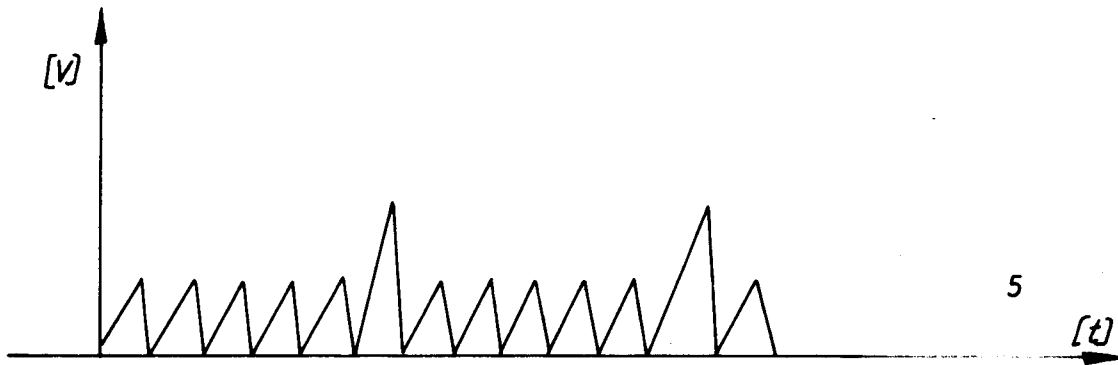


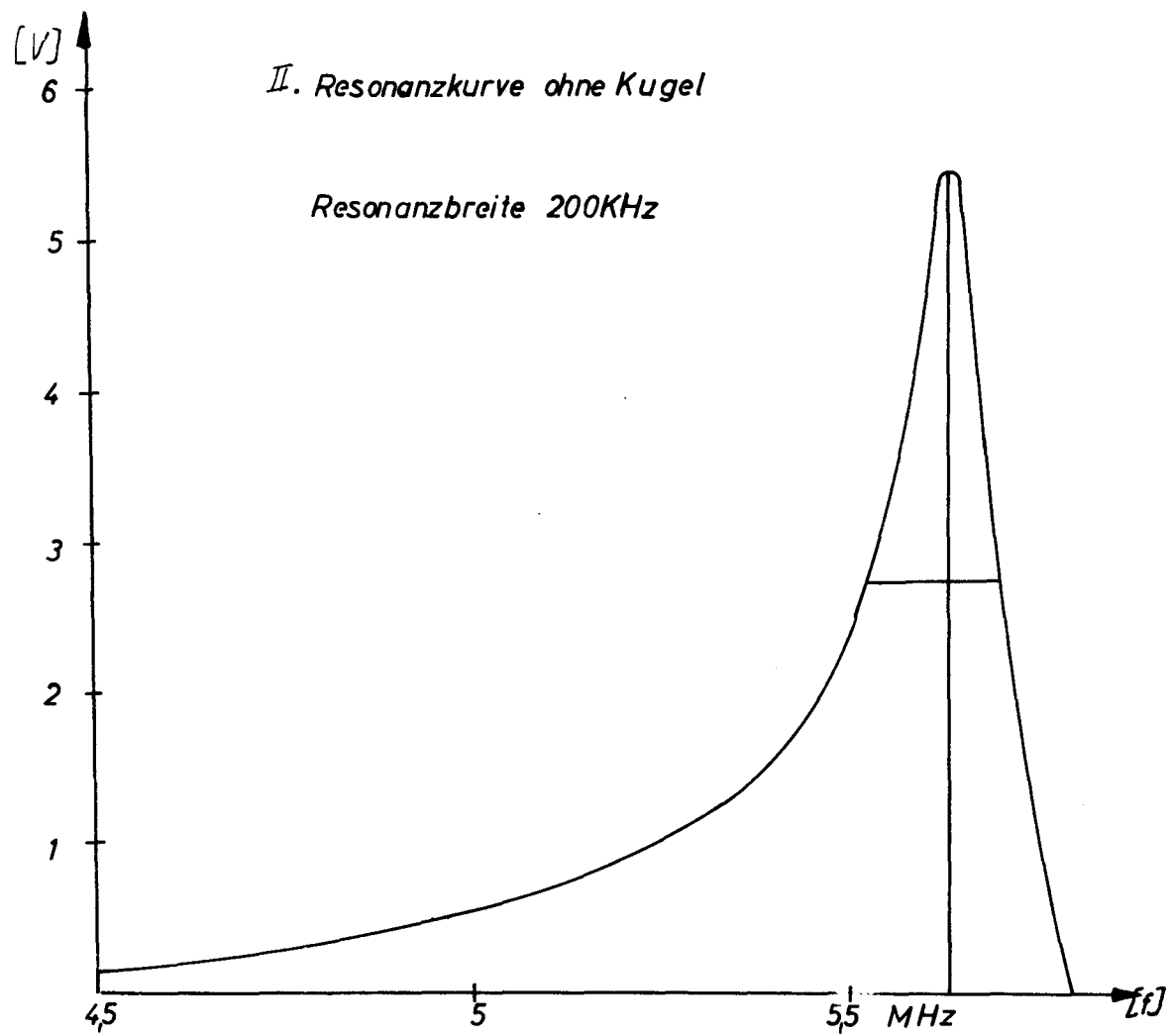
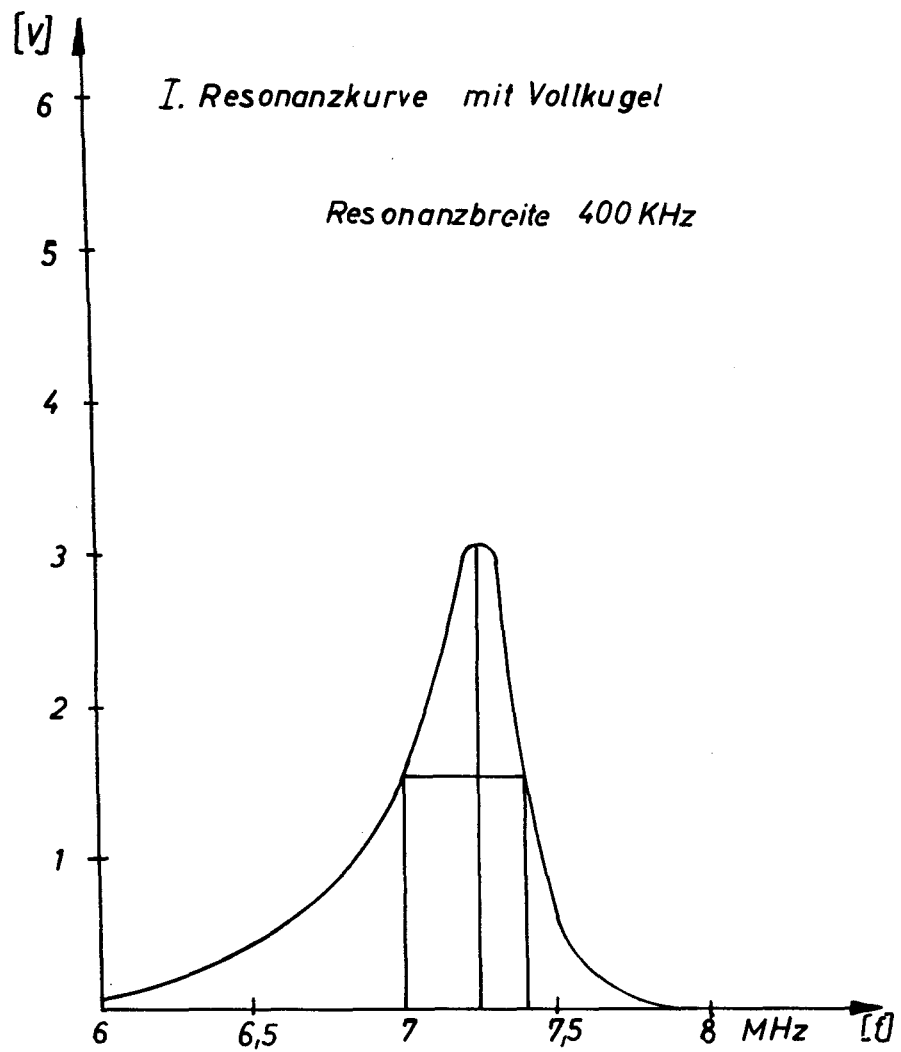
3



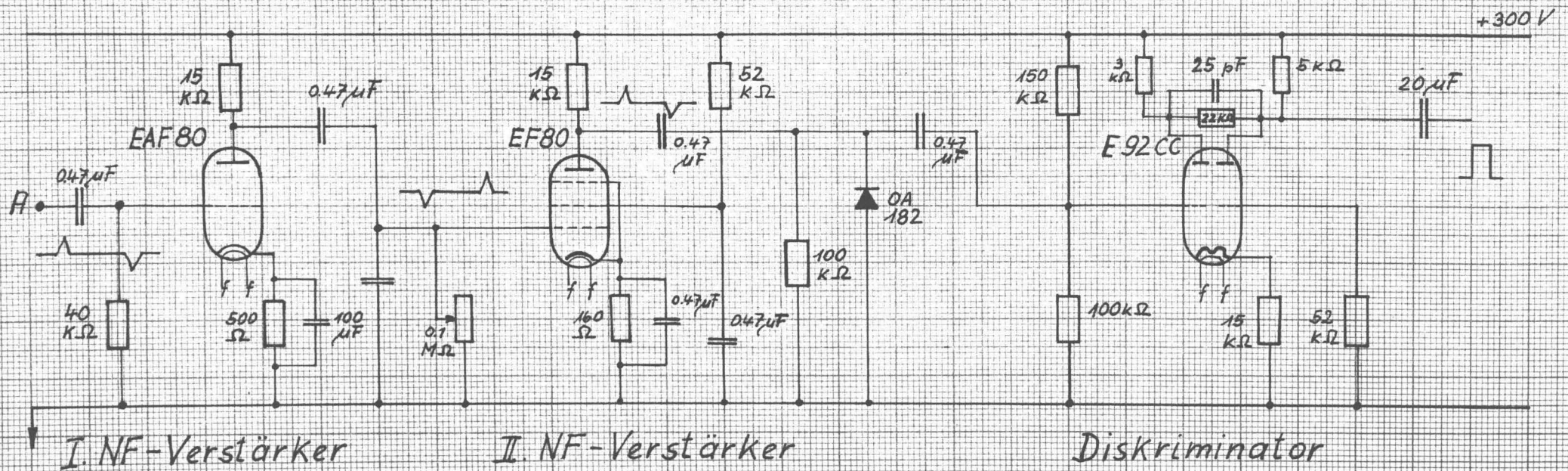
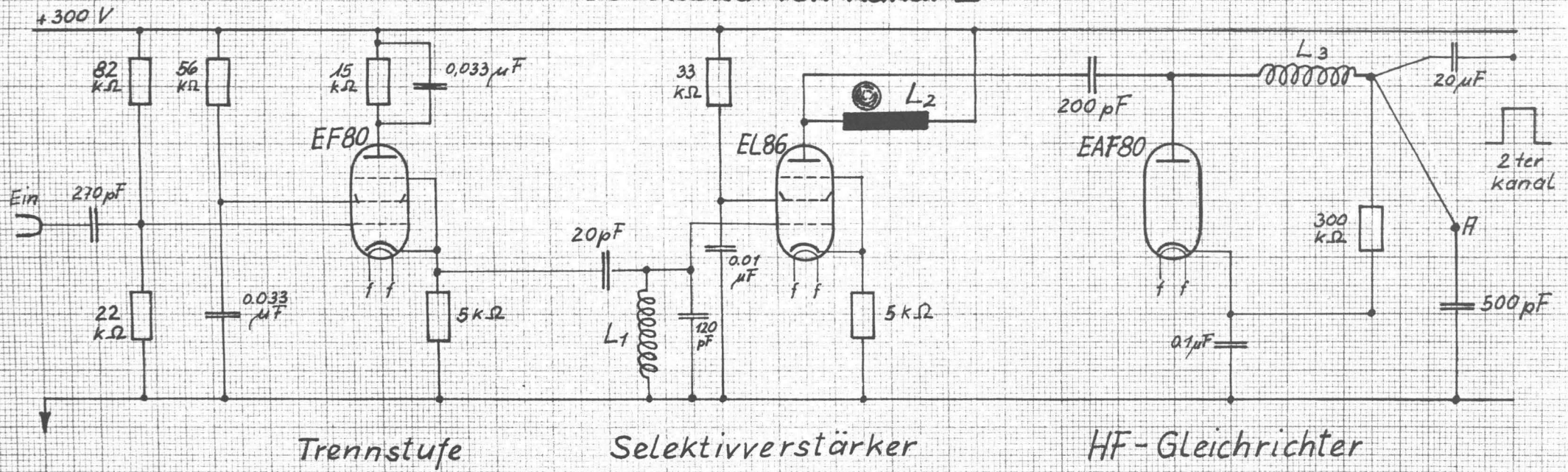
Vollkugel

4





Schaltbild von Kanal I



Schaltbild von Kanal II

